

文章编号: 1007-3124(2002)01-0074-06

弹道靶红外辐射测量

葛学真, 赵成修, 竺乃宜, 张正信

(中国科学院力学研究所高温气体动力学开放实验室, 北京 100080)

摘要:为深入认识再入物理现象,在弹道靶上做了模型头部和近尾流红外辐射测量。发射器为14.5mm口径的二级轻气炮,模型为 $\phi 10\text{mm}$ 的球,材料为聚碳酸酯和铝,模型发射速度4~6km/s,使用红外InSb探测器测量波长3~5.4 μm 的红外辐射,靶室压力5.32kPa。实验中使用光电法测量模型速度,两站阴影照相进行模型姿态监测和速度核实。实验结果表明:球模型的红外辐射强度强烈依赖于模型材料和模型飞行速度。对不同材料模型头部和尾部辐射强度的定性比较说明由于低温材料烧蚀产物的存在,极大地增强了头部和近尾流区的辐射强度,而且延长了尾流辐射长度。

关键词:红外测量;弹道靶;尾流红外辐射;辐射标定

中图分类号:TN215

文献标识码:A

The measurement of infrared radiation for ballistic range

GE Xue-zhen, ZHAO Cheng-xiu, ZHU Nai-yi, ZHANG Zheng-xin

(Laboratory of High Temperature Gas Dynamics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: The infrared radiation measurements of head and near wake of models were carried out in ballistic range for studying of reentry physical phenomenon. The launcher was a two-stage light gas gun with the bore of 14.5mm. The sphere models with diameter of 10mm were made from polycarbonate and Aluminum separately. The flight velocities of the models were about 4~6km/s, InSb detectors were used for measurement of IR radiation with sensitive wavelength were 3~5.4 μm . The pressure in the range is 5.32kPa. During the experiment, the model velocity was measured through photo-electronic devices and two stations of shadow graph monitor the model attitude and provide velocity check. The experiment results show that IR radiation of sphere models strongly depends on model's material as well as flight velocity. IR radiation of polycarbonate models greatly increased as the ablative products entering the wake.

Key words: infrared measurement; ballistic range; wake infrared radiation; calibration of infrared radiation

* 收稿日期: 2000-03-05

基金项目: 中国科学院“八五”军工项目

作者简介: 葛学真(1941-), 女, 山东烟台市人, 中国科学院力学研究所高级工程师。

0 引言

飞行器再入大气层时,由于温度非常高而使得飞行器周围和尾流中发生复杂的物理化学过程,从而形成了再入物理现象这一复杂的研究课题,飞行器周围及其尾流中的红外辐射特性对于突防和反突防技术预研是非常重要的。多年来国内外都投入了大量的人力物力开展这方面的研究。地面模拟实验研究是不可缺少的重要手段。而弹道靶是比较理想的设备,这是因为它能模拟真实的环境空气密度和再入速度,模型是自由飞的,没有支架的气动干扰和高温自由流的辐射干扰。当然它也有不足之处,这就是模型相对较小,姿态和弹道的控制较难。

1 实验设备和测量装置

(1) 实验设备:14.5mm口径的二级轻气炮,发射能力可达7km/s,本实验发射速度为4~6km/s。实验模型为 $\phi 10\text{mm}$ 的铝球和聚碳酸脂球,以及8°小钝锥,球柱体;靶室长14m,直径0.45m;靶室压力5.32kPa(约40mmHg)^[1],模拟高度为20~50km。

(2) 基本测量系统:本系统包括模型速度测量,模型飞行姿态,以及弹道偏航显示等。

速度测量采用三个光电探测器(图1)。这三个探测器分别安装在红外辐射测量站前100mm处;第一纹影照相站的垂直方向和第二纹影照相站的垂直方向。模型在靶室中高速飞行时达到很高的温度而发光,当它经过光电探测器视场时被检测到。这三个光电信号在计时器上记录下两个时间间隔,计算出两个速度值。其中光电探测器1的信号还同

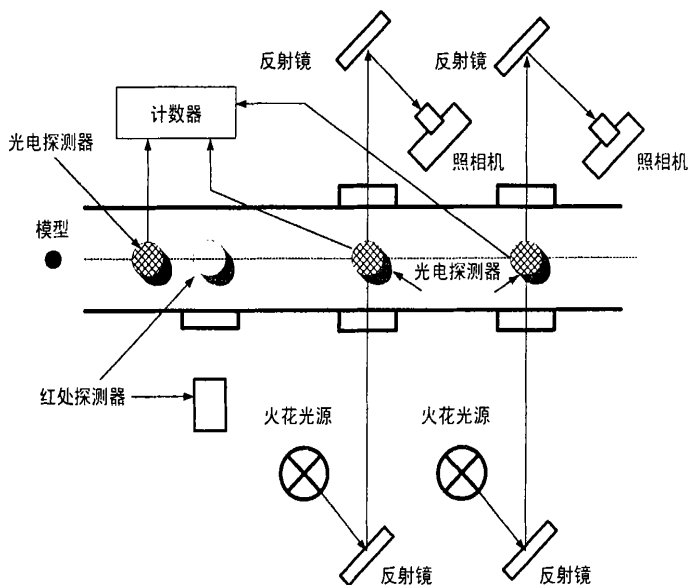


图1 红外测量系统示意图

Fig.1 Measurement system of infrared radiation

时作为红外测量仪器的外同步信号,光电探测器 2 和 3 的信号还分别用于触发两个纹影照相站的火花光源,通过照相得到模型姿态照片,并检验在可见尾流范围内有无其他碎片。此外,两站照相还可以检验和提高速度测量的可靠性。光电探测器靠自身发光来取得信号,而发光强弱受到诸多因素的影响,如速度,真空度,模型材料,偏航等。发光太强容易“提前触发”,弱了不容易捕捉到,采用两站照相可以从模型在照片上的位置来验证和修正测速数据。

(3) 红外辐射测量:红外辐射测量的敏感元件是两只碲化铟(InSb)红外探测器,一个带侧窗,一个带底窗,分别从水平方向和垂直方向对准模型飞行路径,测量两个方向的轴向辐射分布。探测器为光伏型,主要参数:探测器敏感面积为 $\phi 1\text{mm}$;光谱响应范围为 $3 \sim 5.4\mu\text{m}$;响应时间为 $1\mu\text{s}$;响应率为 $2 \times 10^5 \text{ V/W}$;工作温度为 77K 。

靶室观测窗口用 CaF_2 玻璃密封,其红外透过率为 90% 左右。探测器前狭缝宽 3mm ,限制靶室中心的视场宽度为 5.0mm 。实验中碲化铟探测器的输出为毫伏级电压信号,直接用 TC9800 快速 A/D 变换器采集,存储,再回放至示波器显示,照相记录,也可用计算机存储打印数据和曲线。

2 红外探测器的标定

快速 A/D 变换器记录的是电压信号,换算成辐射强度必须对辐射计进行标定,标定所用标准光源是黑体炉,最高温度 1000K ,黑体炉前装有光栏和调制盘。

黑体炉发射的分谱辐亮度与温度 T , 波长 λ 有关。根据普朗克方程,分谱辐亮度表达为^[2]:

$$L(T, \lambda) = \frac{2c^2 h}{5(\lambda^5 (e^{hc/\lambda kT} - 1))} \quad (1)$$

其中 c 为光速(m/s), h 为普朗克常数($\text{J}\cdot\text{s}$), λ 为波长(m), k 为玻尔兹曼常数(J/K), T 为绝对温度(K)。分谱辐亮度的单位: $\text{W/m}^2\text{sr}$ 。

辐射计接收到的有效辐射通量 Φ (W) 为

$$\Phi = \frac{S_1 S_2}{l^2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L(T, \lambda) d\lambda \quad (2)$$

其中 S_1 为黑体辐射源面积(m^2); S_2 为探测器敏感元面积(m^2); l 为黑体辐射源与探测器之间的距离(m)。辐射通量单位: W 。在 $\lambda = 3 \sim 5.4\mu\text{m}$ 之间求

$$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L(T, \lambda) d\lambda$$

的积分得到给定波长范围内辐亮度值。

通过标定可以建立 Φ 与输出电压 V (mV) 之间的对应关系。

$$\Phi = KV$$

其中 K 为响应系数。图 2 给出了两个红外探测器的标定曲线。这是红外电压信号(mV 值)与黑体在所用光谱范围内的辐亮度($L(T, \lambda)$)的关系曲线,见图 2。根据标定曲线,代入实验条件下的 S_1, S_2, l 数值求得红外辐射强度。

实验中,辐射计接收到的目标辐射通量 Φ (W) 为:

$$= \frac{S_s S_t}{l_t^2} \epsilon (T_s) L(T_s) d \quad (3)$$

其中 S_t 为目标辐射源面积; l_t 为目标源与探测器之间的距离; ϵ 为目标源的发射系数, 将目标源近似看成一黑体辐射源, 则 $\epsilon = 1$ 。

由 (2), (3) 式, 可求得其比例系数

$$F = \frac{KV}{F}$$

则

$$= \frac{KV}{F}$$

即可根据实验测得的电压信号换算成辐射通量值。又根据辐射强度 (I)

$$I = \frac{d}{d} = \frac{l_t}{S_t}$$

计算得目标辐射强度, 单位: W/sr 。

3 实验结果

我们分别对聚碳酸酯弹丸和 Tc4 铝弹丸进行了实验。详细的实验条件和结果列入表 1。其中 I_p 为模型头部辐射强度, I_{20} 为距头部 20 倍直径处尾流辐射强度。实验模型飞行的纹影照片和对应的红外信号曲线见图 3。其中 (a) 是聚碳酸酯球模型红外辐射信号和两个纹影站的照片; (b) 是 Tc4 铝球模型红外辐射信号和两个纹影站的照片。从两站的照片可见, 模型在照片中的位置是一致的, 弹托分离较好, 没有碎片进入视场; 瞬态记录的信

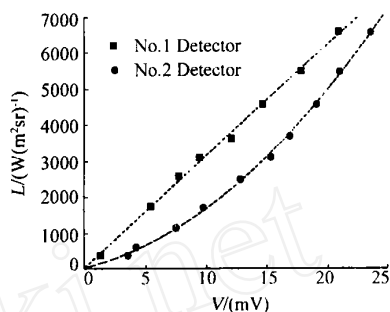


图 2 两个探测器的标定曲线

Fig. 2 Calibration results for the two detectors

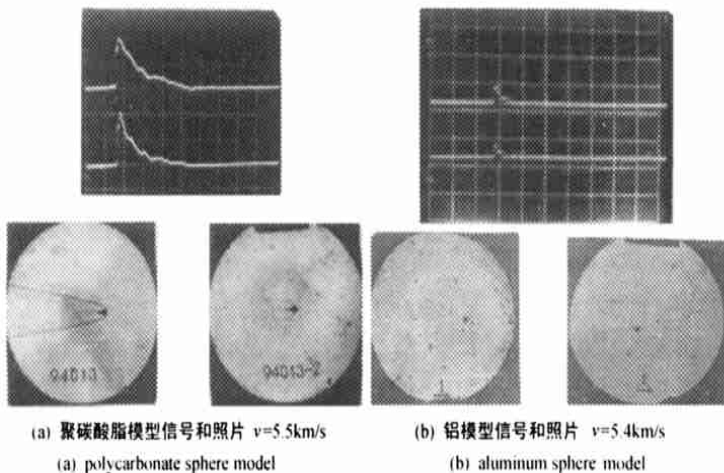


图 3 纹影照片和信号曲线

Fig. 3 Shadowgraph record of sphere and signals of infrared radiation

号曲线清晰。弹丸头部辐射强度随速度的变化情况示于图 4。

表 1 实验条件和测试标定结果

Table 1 Test condition and calibration results

序号	模型 / (mm)	材料	V / (km \cdot s $^{-1}$)	P / kPa	I_p / (W \cdot sr $^{-1}$)	I_{20} / (W \cdot sr $^{-1}$)	飞行情况
171	10 球	聚碳酸酯	4.9	5.32	0.846×10^{-3}	2.31×10^{-4}	正常
064	10 球	聚碳酸酯	5.25	5.32	1.15×10^{-3}	3.5×10^{-4}	正常
074	10 球	聚碳酸酯	5.47	5.32	1.24×10^{-3}	3.42×10^{-4}	正常
165	10 球	聚碳酸酯	5.70	5.32	1.34×10^{-3}	3.74×10^{-4}	正常
171	10 球	聚碳酸酯	4.0	5.32	0.586×10^{-3}	0.76×10^{-4}	正常
190	10 球	聚碳酸酯	4.9	5.45	2.08×10^{-3}	7.02×10^{-4}	正常
183	10 球	聚碳酸酯	6.0	5.32	3.18×10^{-3}	9.05×10^{-4}	正常
070	10 球	Tc4 铝	5.69	5.32	2.25×10^{-4}	5.8×10^{-5}	正常
071	10 球	Tc4 铝	6.22	5.32	5.99×10^{-4}	3.5×10^{-5}	正常
073	10 球	Tc4 铝	5.35	5.32	0.68×10^{-4}	1.6×10^{-5}	正常
176	10 球	Tc4 铝	5.38	5.32	1.44×10^{-4}	2.1×10^{-5}	正常
179	10 球	Tc4 铝	5.25	5.32	1.95×10^{-4}	2.2×10^{-5}	正常
180	10 球	Tc4 铝	5.08	5.58	1.61×10^{-4}	2.1×10^{-5}	正常

4 结 论

(1) 从两种材料的球模型的头部辐射峰值来看,速度对它们有较大的影响,这从图4

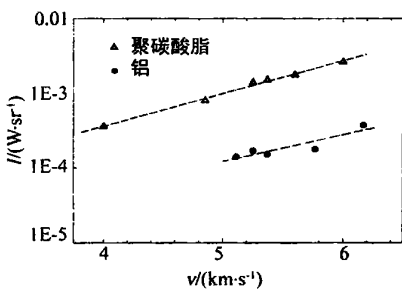


图 4 头部辐射随速度的变化

Fig. 4 Peak infrared intensity versus velocity for the two kinds of model

中的实验结果可以看出。这说明在头部区自由 - 自由电子导致的辐射起着重要作用,因为速度增加使头部激波层温度提高,从而使电子密度迅速增加。这与利用 Kremer 的计算公式^[3]得到的结果是一致的。

(2) 铝模型和聚碳酸酯模型红外辐射的差别比较大。铝模型是一种非烧蚀模型,而聚碳酸酯是一种温度较低的烧蚀材料,因而有较大的差别,主要表现在:

(a) 头部辐射强度,聚碳酸酯的辐射强度比铝的要高出 6 ~ 8 倍;

(b) 在 20 倍直径处,聚碳酸酯的辐射强度比铝的要高出约 10 倍;

(c) 从信号波形看,聚碳酸酯模型的辐射可持续至 100D(D 为模型直径)以上,而铝模型的要短的多。由此可见烧蚀产物对辐射的影响很大,不仅增强了头部辐射强度,而且它进入尾流区增大了尾流的辐射强度,延长了尾流的辐射长度。

5 致 谢

笔者曾就红外标定方法与林贞彬研究员进行探讨,受益匪浅;并得到余西龙博士生的协助,在此表示衷心的感谢!

参考文献：

- [1] 赵成修,葛学真. 高超声速尾流光电特性的弹道靶研究. 中国科学院“八五”国防军工项目评估报告, 1993,10.
- [2] 史斯五琐译,电光学手册. 国防出版社,1978 年版.
- [3] HANSEN C F, PRIMICH R I, STEINBERG M, MAIDEN C J, AIAA, 63 ~ 204.

(上接第 73 页)

- [11] MILLIKAN R C, WHITE D R. Systematics of vibrational relaxation. J. Chem. Phys., 1963,39(12):3029 ~ 3213.
- [12] PARK C. Problems of rate chemistry in the flight regimes of aeroassisted orbital transfer vehicles. Progress in Astronautics and Aeronautics, 1985,96(期):511 ~ 537.
- [13] DUNN M G, KAND S W. Theoretical and experimental studies of reentry plasmas. NASA CR - 2232, 1973.
- [14] 沈 清. 一种高精度、高分辨率激波捕捉的迎风型 NND 格式. 第七届全国计算流体力学会议论文集,1994.
- [15] NONAKA S, TAKAYAMA K, PARK C. Measurement of shock stand - off distance for sphere in ballistic range. AIAA 97 - 0563, Jan. 1997.
- [16] NONAKA S, MIZUNO H, TAKAYAMA K. Ballistic range measurement of shock shapes in intermediate hypersonic regime. AIAA 99 - 1025, Jan. 1999.
- [17] LEJia - ling, WU Ying - chuan, NI Hong-Li et al. Computational interferometry for three - dimension flow. Experiments and Measurements in Fluid Mechanics, 2001, 15(2):1 ~ 9.